

# 官厅水库入库断面水质多指标评价与演变特征分析

彭福利<sup>1</sup>, 张永勇<sup>2</sup>, 李 茜<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>

1. 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 水体质量状况及其污染特征是流域水污染防治规划和治理措施制定的前提和基础。采用主成分分析和层次聚类分析等多元统计分析方法, 选取溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量等 10 个不同类型的监测指标, 综合评价了官厅水库入库断面八号桥 2006—2017 年丰水期和枯水期水质年际变化特征, 识别了不同阶段关键污染指标。结果表明: 各年份丰水期(9 月) 大多数水质指标均优于枯水期(5 月), 特别是粪大肠菌群和氨氮, 但总磷和高锰酸盐指数的差异较小。根据水质指标年际变化情况, 可将研究期分为污染严重阶段(2006—2007 年)、污染改善阶段(2008—2015 年) 和污染全面好转阶段(2016—2017 年)。大部分水质指标呈现逐年好转的趋势, 特别是粪大肠菌群、氨氮和五日生化需氧量, 但总磷仍是官厅水库入库河流的重要污染指标。

**关键词:** 水质评价; 年际变化; 主成分分析法; 层次聚类; 官厅水库

**中图分类号:** X824      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-6002(2020)01-0065-10

**DOI:** 10. 19316/j. issn. 1002-6002. 2020. 01. 09

## Multi-index Evaluation and Evolution Characteristic Analysis of Water Quality at Inlet Section of Guanting Reservoir

PENG Fuli<sup>1</sup>, ZHANG Yongyong<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Assessment of water quality and analysis of pollution characteristics are the premise and basis of water pollution prevention planning and control measures. In this paper, 10 monitoring indicators, such as dissolved oxygen, permanganate index and chemical oxygen demand, were selected as evaluation indicators by combining principal component analysis and hierarchical clustering analysis. The interannual variation characteristics of water quality of Bahaoqiao section in Guanting reservoir entrance during the dry season(May) and floodseason(September) from 2006 to 2017 were comprehensively evaluated, and key pollution indicators at different stages were identified. The results showed that most water quality indicators in flood season were better than those in dry season, especially fecal coliform bacteria and ammonia nitrogen, but the difference of total phosphorus and permanganate index was small. According to the annual variation of water quality indicators, the research period can be divided into three stages: serious pollution stage (2006 - 2007), pollution improvement stage (2008 - 2015) and comprehensive improvement stage (2016-2017). Most water quality indicators showed a trend of improvement year by year, especially fecal coliform bacteria, ammonia nitrogen and five-day biochemical oxygen demand, but total phosphorus was still important pollution indicators of Guanting reservoir inflow river.

**Keywords:** water quality assessment; interannual variation; principal component analysis; hierarchical clustering; Guanting reservoir

“十三五”以来,我国水污染防治工作取得明显成效,但水环境质量形势依然严峻。2017 年,全国 1 940 个地表水国控断面中,32. 1%的断面

未达到Ⅲ类水质标准,8. 3%的断面水质为劣Ⅴ类,而且约 1/3 的重要湖泊呈现不同程度的富营养化。氮、磷等营养源流失引起的水污染问题日

**收稿日期:** 2019-04-04; **修订日期:** 2019-07-24

**基金项目:** 生态环境部环境监测与信息项目(2111101); 国家自然科学基金面上项目(41671024)

**第一作者简介:** 彭福利(1980-),男,北京顺义人,硕士,工程师。

**通讯作者:** 张 鹏

益凸显。如何科学评价水环境质量优劣,摸清水体环境质量的特征,已成为实施《水污染防治行动计划》的重要前提。

目前,已有大量数学方法被成功应用于水环境质量评价,如单因子评价法、综合污染指数评价法、主成分分析法、层次分析法、模糊评价法等<sup>[1-4]</sup>。其中,单因子评价法是目前现行水环境质量评价规范中的常用方法。该方法操作简单,可以直接说明环境质量状况与评价标准之间的关系,判定环境质量指标是否达标,但该方法只能表征一种污染物对环境的影响程度,且各评价参数之间没有关联,有时会因为过于严格的要求使评价结果偏低。综合污染指数评价法是采用各评价因子的监测结果与其评价标准之比作为该因子的污染分指数,通过赋权将各项目分指数综合,进而得到综合污染指数。该方法可以综合反映评价指标的超标程度,便于进行不同区域和不同时期的水环境质量状况比较,但赋权方式多样,不同的赋权方法对评价结果影响较大。相对于单因子评价法和综合污染指数法,主成分分析法和聚类分析法在综合分析水环境质量特征中具有较大优势,可以通过样本数据信息进行降维判别,既考虑了所有指标的信息,也回避了主观赋权对评估结果的影响<sup>[5]</sup>。主成分分析法能够将多个水环境质量评价因子通过数学方法转换为少数几个综合评价指标,将高维空间的问题转化到低维空间来处理,且保留原有因子的绝大部分信息。聚类分析法可以将各水质因子的特征进行抽象和聚类,从而分析其时空分布特征<sup>[6-9]</sup>。

为此,本文选取官厅水库入口处的国控八号桥断面作为研究对象,分别分析2006—2017年每年枯水期(5月)、丰水期(9月)各水质指标的变化特征,并采用主成分分析、层次聚类分析等多元统计手段,综合评价断面水质状况、年际及不同水期水质变化特征,从而为官厅水库水污染成因分析和关键污染因子识别提供借鉴,也为北京市水源地污染防治、保障饮用水安全等提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况和数据收集

永定河是海河水系北系的最大河流,其流域面积为4.70万 $\text{km}^2$ 。官厅水库是永定河最大的

水库,也是北京市重要的备用水源地,一直面临污染风险。在20世纪80年代后期,水库已受到严重污染,并在20世纪90年代持续恶化,最终在1997年被迫退出北京市生活饮用水体系<sup>[10]</sup>。官厅水库入库河流干流包括永定河和妫水河,而永定河由桑干河和洋河两条支流组成<sup>[11]</sup>。其中,桑干河、洋河、妫水河的流域面积分别约为2.6万、1.7万、0.9万 $\text{km}^2$ 。入库河流水污染状况直接影响库区水质。本文选择永定河入库断面八号桥水质观测序列,深入分析主要入库河流(洋河和桑干河)的水污染状况,为识别官厅水库水污染成因提供依据。

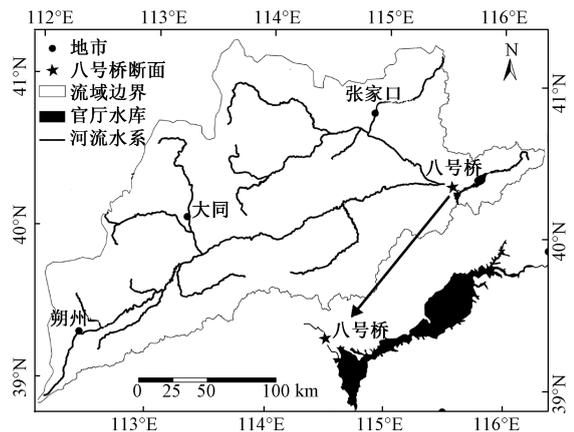


图1 研究区和八号桥断面位置示意图

Fig.1 Location of study area and Bahaqiao section

研究收集了八号桥断面2006—2017年共12年的水质监测数据。为了保证数据的稳定性,避免年际间降雨差异过大造成数据波动,进而影响对数据趋势的分析,本研究选择枯水期(5月)和丰水期(9月)作为研究时段,选择10个指标共240个数据进行分析。监测指标包括体现生物生存基础和水质污染程度的指标溶解氧(DO),反映水中有机物含量的指标高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )和五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ ),反映水体中无机营养物质含量的指标氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )和总磷(TP),反映化工行业工业废水排放程度和农药施用量的指标挥发酚,典型重金属指标汞(Hg)和铅(Pb),以及反映畜禽养殖和农村生活污染物排放程度的指标粪大肠菌群。

### 1.2 水质评价标准

研究期内各水质指标所处级别根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)判断确定,标准限值见表1。

表 1 水质评价标准  
Table 1 Water quality evaluation criteria

序号	项目		I类	II类	III类	IV类	V类
1	DO/(mg/L)	≥	7.5	6	5	3	2
2	COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	≤	2	4	6	10	15
3	COD <sub>Cr</sub> /(mg/L)	≤	15	15	20	30	40
4	BOD <sub>5</sub> /(mg/L)	≤	3	3	4	6	10
5	NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	≤	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
6	TP(以P计)/(mg/L)	≤	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
7	Hg/(mg/L)	≤	0.000 05	0.000 05	0.000 1	0.001	0.001
8	Pb/(mg/L)	≤	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1
9	挥发酚/(mg/L)	≤	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1
10	粪大肠菌群/(个/L)	≤	200	2 000	10 000	20 000	40 000

### 1.3 多元统计分析方法

#### 1.3.1 主成分分析法

主成分分析法是一种降维方法,是把一组相关变量通过线性变换转成另一组不相关的变量,这些新的变量按照方差依次递减的顺序排列,选出少数几个新变量解释原有资料中的大部分变量。由于筛选的水质指标众多,而且许多水质指标存在多重共线性,因此本研究采用主成分分析法来降低水质指标相关性对评价结果的影响<sup>[11]</sup>。

由于当各水质指标间的数值范围差异较大时,数值较大指标对结果的贡献会掩盖数值较小指标的贡献,因而通常采取数学变换来降低各水质指标间的差异。本文采用单因子评价的方法将指标浓度值转化为水质类别,不仅降低了指标间的数量级差异,同时由于在制定标准限值时考虑到了我国水质现状,因而评价结果更具有实际意义,而常用的归一化方法仅仅是一种数学变换,缺乏与实际情况的联系。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),对研究区 2006—2017 年每年汛期和非汛期 10 个监测指标的数据进行评价,并将评价结果建立数据分析矩阵,而后利用主成分分析法对这一时间序列进行主成分分析。初始矩阵的形式为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} = (x_1, x_2, \cdots, x_p) \quad (1)$$

式中: $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{ni})^T (i=1, 2, \cdots, p)$  是水质监测数据评价结果矩阵中第  $i$  个监测指标的数值向量; $p$  是指标的数量,  $p=10$ ;  $n$  为时间序列的长度, 2006—2017 年,共 12 年。

在主成分分析中,主成分间是相互独立的,相关矩阵应该是一个对角矩阵,也就是相关系数矩阵应该等于 0。

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_p \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

式中: $\lambda_i (i=1, 2, \cdots, p)$  是初始矩阵第  $i$  行的特征值,其相应的特征向量为  $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{ip})^T (j=1, 2, \cdots, p)$ ,参考 Jacobian 方法获得; $r_{ij}$  是初始矩阵第  $i$  行和第  $j$  列的相关系数,计算方法为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{x}_i)(x_{ij} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, p) \quad (3)$$

其中: $\bar{x}_i, \bar{x}_j$  分别是初始矩阵第  $i$  行、第  $j$  列的平均值。

如果累积方差贡献率  $\sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i (m=1, 2, \cdots, p)$  达到特定阈值,靠前的  $m$  个主成分就能够充分代表初始矩阵的信息。此处,把阈值设定为 70%,选择对应的前  $m$  个主成分用于接下来的分析,初始矩阵  $\mathbf{X}$  被降维成一个包含前  $m$  个主成分的新矩阵  $\mathbf{P}$ 。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nm} \end{pmatrix} = (p_1, p_2, \cdots, p_m) \quad (4)$$

式中: $p_m$  是第  $m$  个主成分因子,即  $p_m = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (i=1, 2, \cdots, m; n=12)$ 。

#### 1.3.2 层次聚类方法

聚类分析方法主要是通过数据挖掘手段将大量复杂样本划分为几个具有典型特征的群组,被广泛应用于商业、生物、地理等方面的特征信息挖掘。本研究利用聚类分析方法对主成分长时间年际变化的时间序列进行分类,研究断面水质的年

际变化特征<sup>[12]</sup>。采用欧氏距离计算年际间主成分的相似性,采用 Ward 方法计算聚类的类别。主要计算公式为

$$\begin{cases} w = \min \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} ED_{ij}^2 \right) \\ ED_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_k} (p_{ik} - p_{jk})^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K$ 为簇的个数,ED为欧式距离, $p$ 为主成分因子, $N_k$ 为第 $k$ 个簇包含的年份数量, $i,j$ 分别为第 $i$ 、第 $j$ 个簇。

利用 Goodman-Kruskal 指数(GKI)、C 指数(CI)和簇大小来评估聚类效果<sup>[12-13]</sup>。GKI 越大,CI 越小,聚类效果越好,其中 GKI 大于 0.60 且 CI 小于 0.20 代表聚类结果合理。为了确保簇的代表性,设定最小簇的样本数量不小于 2<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3.3 分析工具

采用 R 语言(版本 3.4.4)相关软件包中的功

能函数进行数据的多元统计分析。其中,采用 Stats 软件包(版本 3.4.4)中的 Princomp 功能进行主成分分析;采用 Amap 软件包(版本 0.8-16)中的 Hcluster 功能进行层次聚类<sup>[14]</sup>;采用 Fpc 软件包(版本 2.1-11.1)中的 Cluster.stats 功能进行聚类效果评估<sup>[15]</sup>;采用 Ggplot 2 软件包(版本 2.2.1)画图。

## 2 结果与分析

### 2.1 丰水期和枯水期水质差异性多年统计分析

比较 10 个监测指标在枯水期和丰水期的数据分布差异(表 2),从结果可以看出,与枯水期(5 月)相比,丰水期(9 月)BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、挥发酚和粪大肠菌群的浓度平均值、标准差和最大值明显下降,数据变化幅度明显变小。其余 6 个指标的平均值差异较小,但 DO 浓度标准差下降较多,最大值明显变小。

表 2 原始数据的统计描述

Table 2 Statistical description of raw data

指标	枯水期(5月)				丰水期(9月)			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
DO/(mg/L)	3.2	11.5	6.9	2.2	4.8	8.9	7.0	1.4
COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	1.7	6.6	4.2	1.4	2.0	8.0	4.5	1.6
BOD <sub>5</sub> /(mg/L)	0.5	12.7	3.5	3.3	0.5	7.0	2.8	2.3
NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	0.14	11.70	1.93	3.38	0.23	0.84	0.46	0.18
挥发酚/(mg/L)	0.000 3	0.012 0	0.002 5	0.003 3	0.000 3	0.004 0	0.001 3	0.001 2
Hg/(mg/L)	0.000 04	0.000 05	0.000 05	0.000 00	0.000 04	0.000 05	0.000 05	0.000 00
Pb/(mg/L)	0.001	0.030	0.018	0.007	0.001	0.020	0.016	0.008
COD <sub>Cr</sub> /(mg/L)	9	44	22	9	17	37	22	6
TP/(mg/L)	0.08	0.51	0.25	0.14	0.08	0.58	0.27	0.13
粪大肠菌群/(个/L)	20	24 000	4 058	9 315	20	460	143	158

采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)对研究区各水质指标的水质类别进行评价,结果见图 2。从枯水期(5 月)结果的年际变化来看,大部分指标类别呈下降趋势,但由于 Hg 和 Pb 的浓度值始终在检出限以下,处于较低浓度水平,未出现超标现象。在类别明显变化的指标中,BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 在研究初期(2006—2007 年)呈现 V 类或劣 V 类,而在 2007—2010 年迅速好转,2010 年之后变化趋势趋缓。粪大肠菌群在初期出现超标,2008 年之后迅速改善,再未出现超标。挥发酚在研究期前半段(2006—2011 年)出现个别超标现象,而后迅速改善,在研究期后半段处于

较好水平,无超标现象。DO 总体呈改善趋势,在研究期前半段出现个别超标,后半段无超标现象。COD<sub>Mn</sub>呈现波谷形,在研究初期存在超标,在中期有所改善,到后期又有所反弹,但未出现超标。

从丰水期(9 月)结果来看,监测指标中的 NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Cr</sub>、Pb、Hg 和粪大肠菌群类别变化较小。在研究期前半段,NH<sub>3</sub>-N、挥发酚和粪大肠菌群对应的水质类别明显好于枯水期,未出现超标;BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TP 和挥发酚总体均好于枯水期,其他指标基本持平。而在研究期后半段,与枯水期(5 月)相比,TP、COD<sub>Cr</sub>和 BOD<sub>5</sub> 的超标次数有所增加,其他指标基本持平。

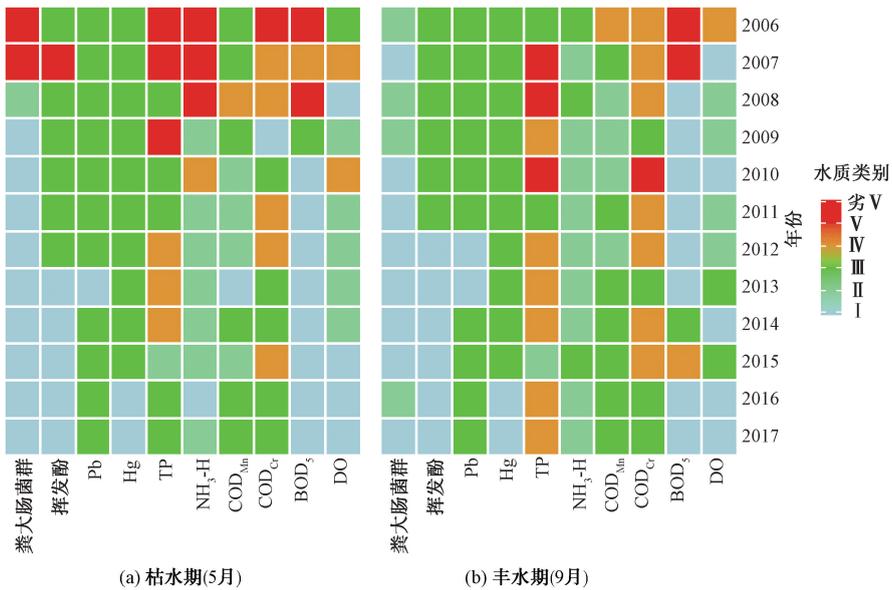


图2 2006—2017年枯水期(5月)和丰水期(9月)水质指标评价结果

Fig.2 Evaluation results of water quality indicators in dry season (May) and flood season (September) from 2006 to 2017

2.2 丰水期和枯水期水质差异性主成分分析

分别对枯水期和丰水期各水质指标的评价结果进行降维处理,形成几个独立的主成分,具体结果见表3和图3。从枯水期降维结果来看,方差贡献率大于10%的主成分有5个,对应的数值分别为27.4%、17.5%、13.4%、11.9%、10.1%,其中前4个、前5个主成分的累积方差贡献率均高于70%,对应的数值分别为70.1%、80.2%。主成分1与BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、粪大肠菌群有关;主成分2与COD<sub>Mn</sub>、Hg、Pb有关;主成分3主要与COD<sub>Cr</sub>有关;主成分4与TP、Pb有关;主成分5与DO、Hg有关。以上主成分涉及所有水质指标。

表3 主成分对应水质指标

Table 3 Principal components corresponding to water quality indicators

月份	主成分	方差贡献率/%	水质指标
5	1	27.4	BOD <sub>5</sub> 、NH <sub>3</sub> -N、粪大肠菌群
	2	17.5	COD <sub>Mn</sub> 、Hg、Pb
	3	13.4	COD <sub>Cr</sub>
	4	11.9	TP、Pb
	5	10.1	DO、Hg
9	1	20.0	DO、BOD <sub>5</sub> 、NH <sub>3</sub> -N
	2	17.5	COD <sub>Cr</sub> 、TP、挥发酚
	3	15.4	Hg、Pb、粪大肠菌群
	4	13.7	BOD <sub>5</sub> 、COD <sub>Mn</sub> 、粪大肠菌群
	5	10.1	TP

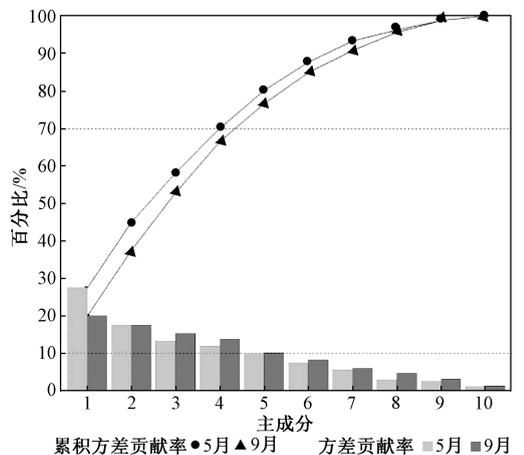


图3 枯水期(5月)和丰水期(9月)水质指标主成分方差贡献率及累积方差贡献率

Fig.3 Dimension-reducing principal components and cumulative variance of water quality indicators in dry season (May) and flood season (September)

从丰水期降维结果看,方差贡献率大于10%的主成分也有5个,对应的数值分别为20.0%、17.5%、15.4%、13.7%、10.1%,且前5个主成分的累积方差贡献率已达76.7%。主成分1与BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、DO有关;主成分2与COD<sub>Cr</sub>、TP、挥发酚有关;主成分3主要与Hg、Pb、粪大肠菌群有关;主成分4与BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、粪大肠菌群有关;主成分5与TP有关。以上主成分也包含了所有水质指标。

### 2.3 丰水期和枯水期水质差异性聚类分析

权衡主成分的数量和累积方差贡献率,对2006—2017年枯水期和丰水期均选择前5个主成分用于层次聚类分析,结果见图4。丰水期和枯水期各年份水质指标主成分的相似性均较高,如2016年和2017年、2008年和2009年、2010—2011年和2014年、2012年和2013年等。根据各年份的分布特征,可将整个研究期分为3组,即枯水期为2006—2007年、2008—2015年、2016—2017年;丰水期为2006年和2015年、2007—2014年、2016—2017年。除2015年丰水期外,枯水期和丰水期水质指标的年际变化特征是基本一致的。从聚类的评估结果来看,枯水期和丰水期的GKI分别为0.62、0.65,CI、最小簇数量均分别为0.16、2。因此,枯水期和丰水期的聚类结果均是合理的。

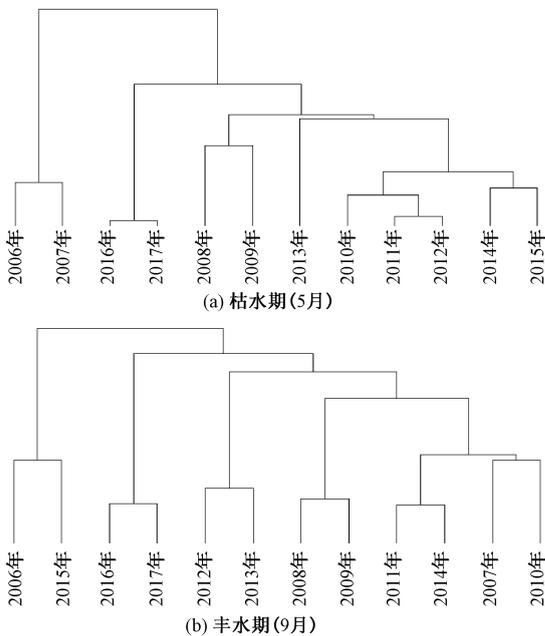


图4 枯水期和丰水期水质指标年际变化的聚类结果

Fig.4 Clustering results of interannual variations of water quality indicators in dry season and flood season

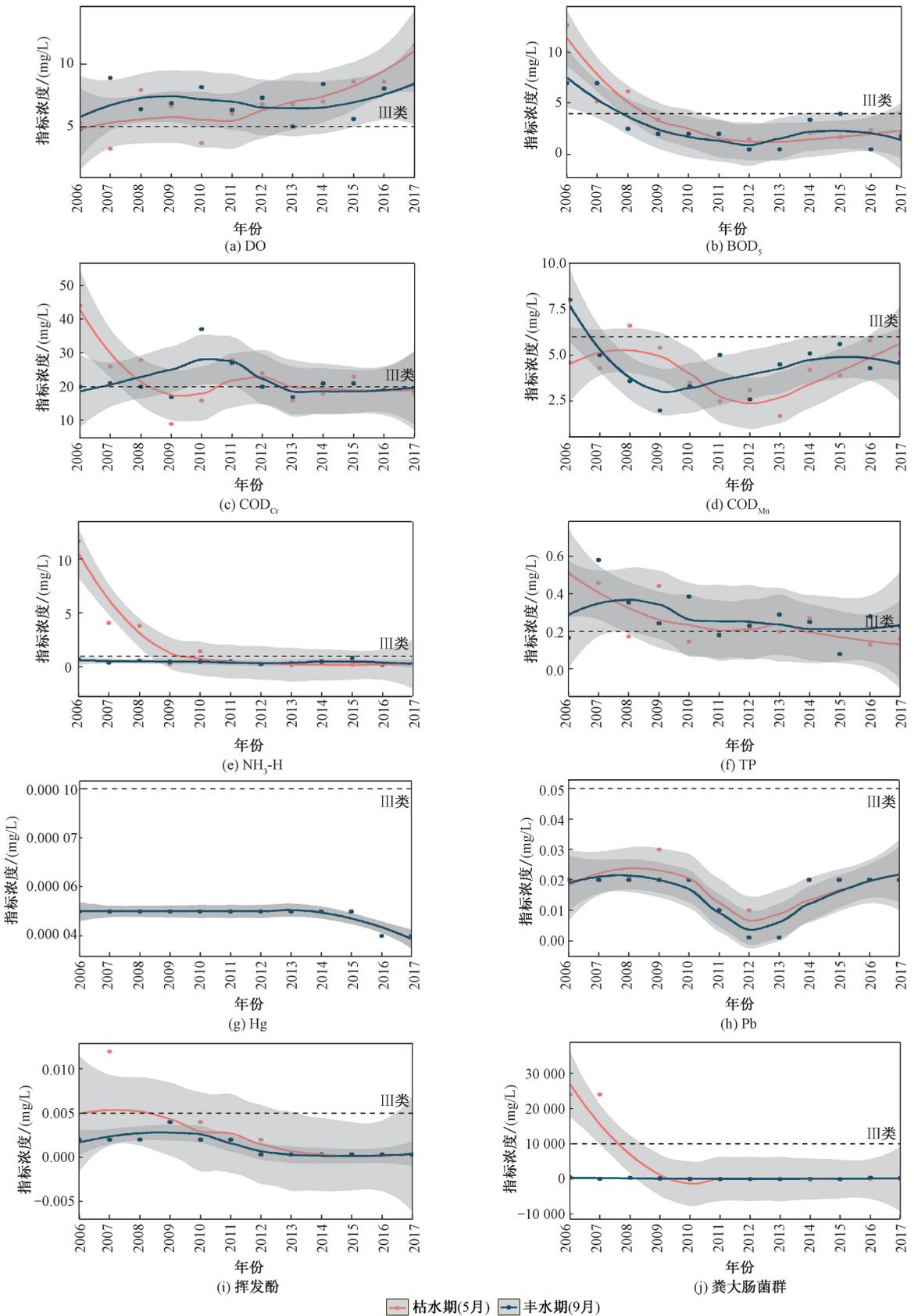
### 2.4 水质年际变化特征

不同分组的水质指标年际变化特征如图5所示。在枯水期,分组1为2006—2007年,该时期断面超标因子较多,包括 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、粪大肠菌群和DO。其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP最为

严重,均为劣V类; $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和粪大肠菌群连续两年均出现超标(超过Ⅲ类);DO和挥发酚在2007年出现超标。因此,这一时期污染较为严重。分组2为2008—2015年,该时期水质逐年改善,出现超标的监测指标数量逐年减少,级别也明显降低。其中,粪大肠菌群改善效果最为显著,无超标情况出现;TP和 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 多年出现超标,但级别有所降低,除TP在2008年出现劣V类外,其余超标现象均为Ⅳ类; $\text{BOD}_5$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 也改善明显,仅在2008年和2010年出现超标;DO、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 分别在2008年、2010年超标,且均为Ⅳ类。因此,这一阶段的水体污染状况得到了一定程度的改善。分组3为2016—2017年,该时期断面水质已得到全面改善,监测指标未出现超标现象,水质全面好转。

丰水期水质变化情况与枯水期比较相似。分组1为2006年和2015年,期间断面DO、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 出现超标。分组2为2007—2014年,期间水质有所改善,出现超标的监测指标数量有所减少,类别有所降低。其中,TP和 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 在大部分时间出现超标, $\text{BOD}_5$ 仅在2007年出现超标,其余指标均不超标。分组3为2016—2017年,期间断面水质基本得到改善,除TP外,其他监测指标未出现超标。

3个分组在枯水期(5月)和丰水期(9月)的水质类别分布特征如图6所示,总体按照分组1、分组2和分组3的顺序逐渐好转,丰水期好于枯水期。但从不同监测指标看,虽同处于污染严重阶段,但分组1中的 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、挥发酚和粪大肠菌群的类别均值在丰水期要明显低于枯水期,特别是TP在枯水期出现劣V类,而在丰水期均未超标,这可能是在聚类分析时把丰水期的2006年和2015年归为1组的主要原因。分组2中,除TP在丰水期的水质类别均值明显高于枯水期外,其他指标的水质类别的均值差异不明显,但指标类别的分布范围存在差异。其中,DO的水质类别分布范围在丰水期要大于枯水期,而 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的水质类别分布范围在丰水期要小于枯水期。分组3中,仅TP的水质类别在丰水期和枯水期差异较大。



注:5月和9月 Hg 浓度均低于检出限,数值均标注为检出限的 1/2。

图5 枯水期(5月)和丰水期(9月)水质指标变化特征

Fig.5 Variation characteristics of water quality indicators in dry season (May) and flood season (September)

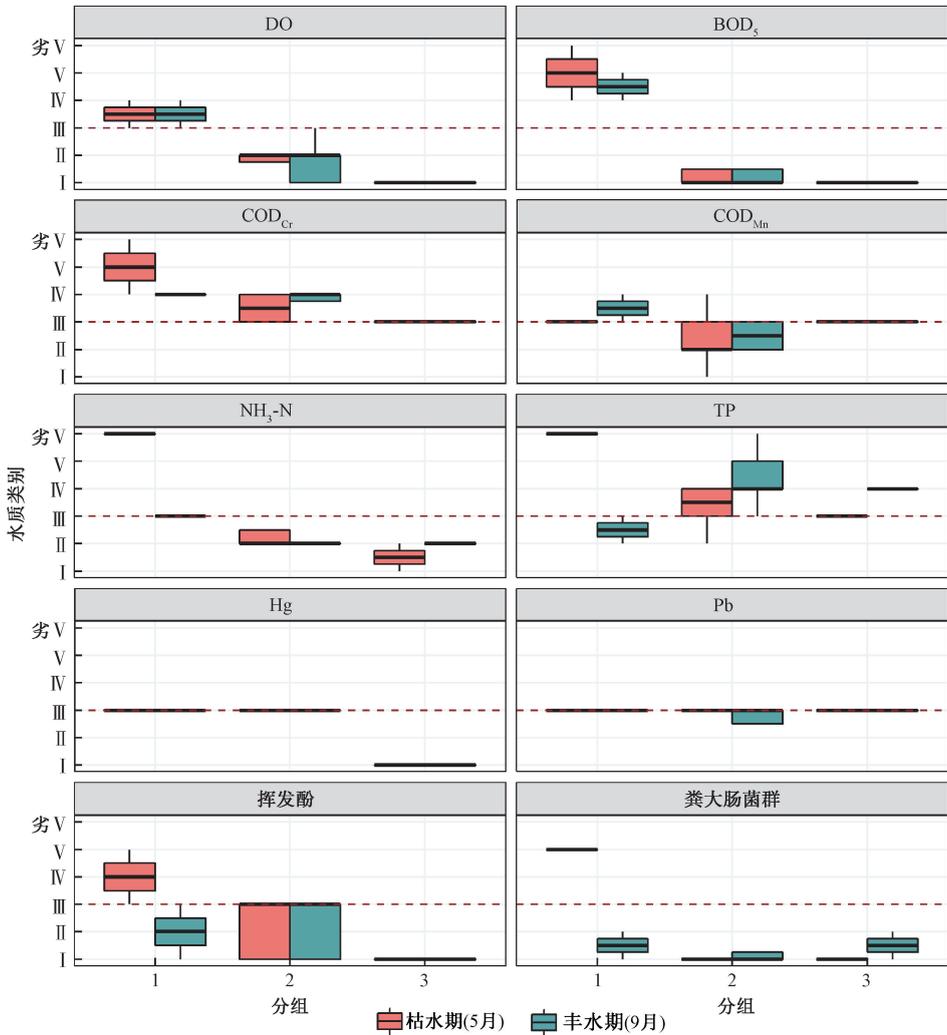


图6 不同分组的枯水期(5月)和丰水期(9月)水质类别变化特征

Fig.6 Variation characteristics of water quality categories in dry season (May) and flood season (September) of different groups

### 3 结论与展望

本文针对官厅水库入库断面水质,采用主成分分析和层次聚类分析等多元统计分析手段相结合的方法,综合考虑 BOD<sub>5</sub>、营养源以及重金属等水质指标,评价了官厅水库入库断面水污染综合状况,辨识了污染的年际变化特征和主要污染指标。研究结果表明:

1)从总体来看,丰水期(9月)水质明显好于枯水期(5月)。其中,粪大肠菌群、NH<sub>3</sub>-N、BOD<sub>5</sub>和挥发酚的指标浓度平均值、标准差和最大值明显低于枯水期;TP 和 COD<sub>Mn</sub>在两个时间段的差异

不大。从聚类结果来看,在分组1中,不同监测指标的水质类别在丰水期和枯水期的差异较大,且丰水期明显好于枯水期。分组2和分组3在丰水期和枯水期的差异逐渐缩小。大部分指标的类别在丰水期均好于枯水期,但 TP 在分组2和分组3则相反,在丰水期的水质类别要好于枯水期。

2)官厅水库入库河流水质总体呈现逐年好转趋势。其中,2006年和2007年丰水期除 TP 外,其他指标的水质类别差异不大。因而以枯水期的聚类分析结果为基础,参考丰水期聚类结果的大部分特征,可将研究期分为污染严重阶段(2006—2007年)、污染改善阶段(2008—2015年)和污染全面好转阶段(2016—2017年)。

3) 枯水期在污染严重阶段有 6 个水质指标出现 V 类或劣 V 类,其中 TP、NH<sub>3</sub>-N 和粪大肠菌群最为严重;在污染改善阶段,大部分水质指标(如粪大肠菌群、NH<sub>3</sub>-N 和 BOD<sub>5</sub>)有了明显改善,仅有 3 个水质指标出现 V 类或劣 V 类,分别为 TP、NH<sub>3</sub>-N 和 BOD<sub>5</sub>;在污染全面好转阶段,所有水质指标均在 I~III 类水质范围内。

4) 丰水期在污染严重阶段有两个水质指标出现 V 类或劣 V 类,其中 BOD<sub>5</sub> 最为严重;在污染改善阶段,BOD<sub>5</sub> 有了明显改善,但 TP 和 COD<sub>Cr</sub> 仍出现 V 类;在污染全面好转阶段,除 TP 外,所有水质指标均在 I~III 类水质范围内。

5) 粪大肠菌群、NH<sub>3</sub>-N 和 BOD<sub>5</sub> 是改善最明显的水质指标,TP 仍是官厅水库入库河流的重要污染指标。

自“十一五”起,官厅水库上游洋河、桑干河流域先后建成了大量污水处理厂和污水处理设施<sup>[16]</sup>,使水质逐年改善。2006—2007 年,断面水质因子超标状况仍然较多,说明流域内污染物入河量依然较大。2008 年后,随着治污设施的逐步投入使用,以 COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 为代表的生活污染,以挥发酚、Hg 和 Pb 等重金属为代表的工业废水,以粪大肠菌群为代表的畜禽养殖和农村生活污染物的排放程度等都得到了明显的控制。“十二五”期间,流域内水质较为平稳,已经消除了劣 V 类。进入“十三五”后,对流域污染排放的管控更加严格,尤其是农业面源污染。该阶段,流域污染排放得到更加有效的控制,断面水质已根本好转,但农业面源中的 TP 仍是一大污染风险,特别是在降雨充沛的丰水期。因此,官厅水库水污染防治仍需加强农业面源污染控制,调整上游农业种植模式,减少化肥施用量和农业耕作面积。

#### 参考文献 (References):

[ 1 ] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.

LI Mingsheng, ZHANG Jianhui, LIANG Nian, et al. Comparisons of Some Common Methods for Water Environmental Quality Assessment [J]. Progress in

Geography, 2012, 31(5): 617-624.

- [ 2 ] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733.
- YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative Study on Typical River Comprehensive Water Quality Assessment Methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733.
- [ 3 ] 方晓波, 骆林平, 李松, 等. 钱塘江兰溪段地表水质季节变化特征及源解析 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1 980-1 988.
- FANG Xiaobo, LUO Linping, LI Song, et al. Seasonal Variations and Source Identification of Surface Water Quality in Lanxi Segment of Qiantang River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 1 980-1 988.
- [ 4 ] 花瑞祥, 张永勇, 刘威, 等. 不同评价方法对水库水质评价的适应性分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 1-6.
- HUA Ruixiang, ZHANG Yongyong, LIU Wei, et al. Adaptability Analysis of Multiple Evaluation Methods in Reservoir Water Quality Evaluation [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 1-6.
- [ 5 ] ZHANG Y Y, ZHAI X Y, SHAO Q X, et al. Assessing Temporal and Spatial Alterations of Flow Regime in the Regulated Huai River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 384-397.
- [ 6 ] 龚路军, 杨学芬, 熊邦喜, 等. 武汉市夏季湖泊水体理化指标主成份和聚类分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 550-554.
- GONG Luojun, YANG Xuefen, XIONG Bangxi, et al. Study of Water Physical and Chemical Indexes of Lakes in Wuhan City in Summer by Means of Principal Component Analysis and Cluster Analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6): 550-554.
- [ 7 ] 蔡金傍, 李文奇, 逢勇, 等. 洋河水库水质主成分分析 [J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 62-66.
- CAI Jinbang, LI Wenqi, PANG Yong, et al. Factor Analysis of Water Quality in Yanghe Reservoir [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(2): 62-66.
- [ 8 ] 汪红军, 颜昌龙, 李嗣新, 等. 洪湖水水质空间特异性及主导因子分析 [J]. 中国环境监测, 2012, 28(3): 72-75.

- WANG Hongjun, YAN Changlong, LI Sixin, et al. Spatial Distribution and Dominant Factor of Water Quality in Honghu Lake in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(3): 72-75.
- [ 9 ] 李东青, 梁籍, 张立燕, 等. 密云库区 1991—2011 年水质变化趋势研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1 675-1 685.
- LI Dongqing, LIANG Ji, ZHANG Liyan, et al. The Research of Water Quality Trend in the Miyun Reservoir from 1991 to 2011[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(6): 1 675-1 685.
- [10] 王经臣. 官厅水库水质修复的理论与实践[J]. *甘肃水利水电技术*, 2014, 50(12): 42-44.
- WANG Jingchen. Theory and Practice of Water Quality Restoration in Guanting Reservoir [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2014, 50(12): 42-44.
- [11] 李运来. 官厅水库水质现状评价与分析[J]. *北京水务*, 2007(1): 4-7.
- LI Yunlai. Evaluation and Analysis of Water Quality of Guanting Reservoir[J]. *Beijing Water*, 2007(1): 4-7.
- [12] ZHANG Y Y, ZHAI X Y, ZHAO T T G, et al. Annual Shifts of Flow Regime Alteration: New Insights from the Chaishitan Reservoir in China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1 414.
- [13] ZHANG Y Y, SHAO Q X, ZHAO T T G, et al. Comprehensive Assessment of Dam Impacts on Flow Regimes with Consideration of Interannual Variations [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 447-459.
- [14] LUCAS A, JASSON S. Using amap and etc Packages for Huge Clustering[J]. *R. News*, 2006, 6(5): 58-60.
- [15] HENNIG C, LIAO T F. How to Find an Appropriate Clustering for Mixed-type Variables with Application to Socio-economic Stratification[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C ( Applied Statistics )*, 2013, 62(3): 309-369.
- [16] 丁军. 官厅水库跨界流域管理体制研究[J]. *绿色科技*, 2017(6): 231-233.
- DING Jun. Study on Management System of Guanting Reservoir Transboundary Watershed [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(6): 231-233.